

*А.Л. Готман, д.т.н., профессор
ГУП институт «БашНИИстрой», г.Уфа
Ю.А. Готман, к.т.н.
ООО «Подземпроект», г. Москва*

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ГРУНТОВ ОГРАЖДЕНИЯ ГЛУБОКИХ КОТЛОВАНОВ

Разработана методика определения параметров закрепления грунтов ограждения глубоких котлованов. При этом использована двухэтапная итерационная схема из условия минимального объема закрепления, обеспечивающего перемещение верха удерживающей конструкции в допустимых пределах. Разработан метод определения рационального объема зоны закрепления выше и ниже дна котлована, достаточного для обеспечения достижения заданных ограничений.

Ключевые слова: *инъекционное закрепление грунта, ограждение глубокого котлована, активное давление грунта, давление грунта в состоянии покоя, коэффициент постели.*

*А.Л. Готман, д.т.н., профессор
ГУП институт «БашНИИстрой», м.Уфа
Ю.А. Готман, к.т.н.
ВАТ «Подземпроект», м. Москва*

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ЗАКРІПЛЕННЯ ҐРУНТІВ ОГОРОДЖЕННЯ ГЛИБОКИХ КОТЛОВАНІВ

Розроблено методику визначення параметрів закріплення ґрунтів огородження глибоких котлованів. При цьому використана двохетапна ітераційна схема з умови мінімального об'єму закріплення, що забезпечує переміщення верху утримуючої конструкції в допустимих межах. Розроблено метод визначення раціонального об'єму зони закріплення вище і нижче дна котлована, що достатньо для забезпечення досягнення заданих обмежень.

Ключові слова: *ін'єкційне закріплення ґрунту, огородження глибокого котлована, активний тиск ґрунту, тиск ґрунту в стані спокою, коефіцієнт постелі.*

*A.L. Gotman, Prof., DrSc.
ГУП institut «BashNIISTroy», Ufa
Yu.A. Gotman, Dr-Ing.
«Podzemproject» Ltd, Moscow*

THE DESIGN PECULARITIES OF GROUTING OF RETAINING STRUCTURE OF DEEP EXCAVATION

It is developed the method for determining the parameters of grouting of retaining structure of deep excavation. In this two-step iterative scheme of minimum conditions of grouting, which provides moves the top of the retaining structure in tolerance limits. It is developed the method for determining rational volume zone of grouting above and below the bottom of the excavation, sufficient to ensure the achievement of specified constraints.

Keywords: *jet grouting of soil, retaining structure of deep excavation, active earth pressure, earth pressure at rest, bed ratio.*

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими заданиями. При проектировании объектов, возводимых в глубоких котлованах (глубиной 10 и более метров) для обеспечения устойчивости их бортов на действие горизонтального давления грунта, как правило, применяются удерживающие конструкции в виде «стена в грунте» или буросекущие сваи.

Анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение проблемы. Проблемы ограждений глубоких котлованов рассмотрены в работах [1 – 6].

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается статья. Одним из путей повышения эффективности работы ограждающих конструкций является повышение механических характеристик грунтов путем их закрепления напорной инъекцией цементного раствора.

При этом достигается двойной эффект:

- при закреплении грунта выше дна котлована за счет повышения прочностных характеристик грунта уменьшается горизонтальное давление;
- при закреплении грунта ниже дна котлована увеличивается жесткость основания, в которое заделана та или иная удерживающая конструкция.

Поэтому за **цель работы** принято разработать методику определения параметров закрепления грунтов ограждения глубоких котлованов.

Изложение основного материала исследований. Из поставленной задачи следует, что при постоянных конструктивных параметрах удерживающей конструкции (сваи, стены в грунте) перемещение верха сваи U_0 является функцией объема закрепления двух участков: выше дна V_1 и ниже дна котлована V_2 :

$$U_0 = f(V_1, V_2). \quad (1)$$

Задача заключается в определении объемов закрепления V_1 и V_2 и их оптимального сочетания, критерием которого является максимально допускаемое перемещение верха удерживающей конструкции.

Для решения задачи определения перемещения верха удерживающей конструкции от горизонтального давления грунта примем следующие предпосылки.

1. Удерживающая конструкция рассматривается как вырезанная полоса в виде гибкого стержня единичной ширины, обладающего изгибной жесткостью EJ и размером поперечного сечения axb , м, где b – ширина стороны поперечного сечения перпендикулярного действию горизонтальной нагрузки. Часть стержня заглублена в грунт на величину l , а часть – длиной h находится выше поверхности грунта (рис. 1, а).

2. Стержень упруго защемлен ниже дна котлована в Винклеровском основании, характеризуемым коэффициентом постели C , $т/м^3$, изменяющимся по глубине по какому-либо закону.

3. К стержню приложена горизонтальная нагрузка от давления грунта q , $т/м$, распределенная по всей длине стержня на участке выше поверхности грунта, изменяющаяся по длине по какому-либо закону.

4. Задача решается в конечноэлементной постановке в стержневой аналогии по итерационной схеме.

В отличие от стандартной постановки задачи, здесь так же, как значения перемещений и углов поворота ограждения, значение нагрузок и коэффициента постели являются переменными величинами, которые требуется определить.

Последовательность расчета:

1. В соответствии с расчетной схемой определяем горизонтальное давление исходного (не закрепленного) грунта на стержень выше поверхности грунта по теории предельного равновесия

$$q_z = \gamma z t g^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) - \frac{c}{t g \varphi} \quad (2)$$

Получаем треугольную эпюру давления (рис. 1, а).

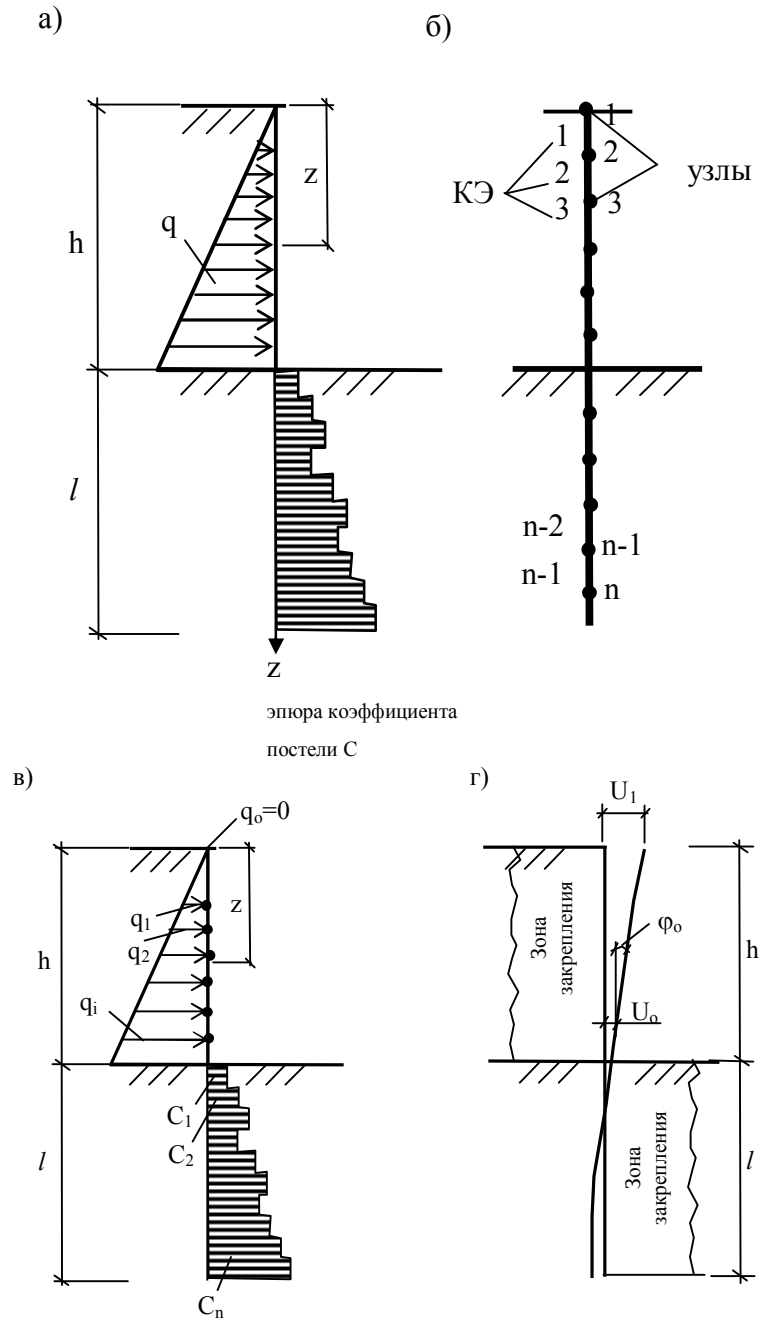


Рисунок 1 – Расчетная схема: а) схема нагрузки и сопротивления грунта; б) схема дискретизации на КЭ; в) приведенная конечноэлементная схема нагрузок и сопротивления грунта; г) деформационная схема

2. Разбиваем весь стержень на конечные элементы – n элементов (рис. 1, б).

3. Исходя из эпюры давления q_z определяем q_i в узлах КЭ (рис. 1, в).

Определяем сосредоточенную нагрузку H_i в узлах элементов выше дна котлована

как
$$H_i = \frac{q_i + q_{i-1}}{2} \cdot h_i,$$

где h_i – длина конечного элемента.

4. Определяем значения изгибной жесткости EJ и коэффициента постели C_i для каждого КЭ ниже дна котлована.

5. Выполняем расчет стержня на горизонтальную нагрузку по конечно-элементной программе [1] на действие давления грунта в природном состоянии при коэффициенте постели природного грунта. Нагрузку прикладываем в узлах элементов как сосредоточенную (H_i), определенную в п. 3.

По результатам расчета получаем горизонтальное перемещение стержня U_i для каждого элемента и верхнего конца стержня U_o .

Учитывая консольную схему работы, точно известно, что максимальное горизонтальное перемещение ограждения будет в верхней его точке, поэтому критерием определения требуемого объема закрепления будет ограничение перемещения в верхней точке каким-либо изначально заданным значением.

6. Далее осуществляется процедура поиска требуемого объема закрепленного грунта, исходя из ограничения горизонтальных перемещений удерживающей конструкции. Процесс разделяется на два этапа.

На первом этапе определяется такой коэффициент постели ниже дна котлована C_{on} и такое горизонтальное давление грунта выше дна котлована, при которых выполняется условие

$$U_o \leq U_{don}. \quad (3)$$

Если это условие соблюдается, то закрепление грунтов не требуется и расчет прекращается. Если условие (3) не соблюдается, то определяем, насколько полученное перемещение верхнего конца стержня U_o больше допускового перемещения U_{don} , т.е.

$$\alpha = \frac{U_o}{U_{don}}. \quad (4)$$

7. Поскольку задача решается в линейной постановке, т.е. принята линейная зависимость между нагрузкой и деформацией (модель местных деформаций), определяем новый требуемый коэффициент постели ниже поверхности грунта C'_i как

$$C'_i = C_i \cdot \alpha. \quad (5)$$

8. Для каждого элемента выше поверхности грунта определяется виртуальный коэффициент постели \bar{C}_i :

$$\bar{C}_i = \frac{q_i}{U_i}, \quad (6)$$

где q_i – горизонтальное давление в i -ом узле, определенное по п. 3;

U_i – горизонтальное перемещение i -го элемента, определенного по п. 5.

9. Учитывая, что после укрепления грунта выше дна котлована его прочность возрастает, (а следовательно, и увеличивается коэффициент постели), горизонтальное давление грунта уменьшается, определяемое коэффициентом α . Записываем новое расчетное значение горизонтального давления грунта q'_i как

$$q'_i = \frac{\bar{C}_i \cdot U_i}{\alpha} = \frac{q_i}{\alpha}. \quad (7)$$

10. Таким образом, по завершении первого расчетного шага имеем новый коэффициент постели укрепленного грунта C'_i ниже поверхности грунта и новое (уменьшенное) давление q'_i укрепленного грунта выше дна котлована.

Далее проверяется условие

$$|\alpha_{i-1} - \alpha_i| \leq \varepsilon, \quad (7.1)$$

где ε – малая величина (например, 0,01), характеризующая сходимость процесса поиска.

Если условие (7.1) выполняется, то расчет завершается. Если нет – расчет производится заново, определяются новые значения α , C'_i , q'_i , ε .

В результате вычислений на первом этапе имеем требуемое значение коэффициента постели грунта ниже дна котлована и давление грунта (т. е. требуемую величину его снижения) выше дна котлована. Компьютерные расчеты, выполненные в тестовом режиме, показали, что расчетный процесс завершается на 4-ой или 5-ой итерации.

Переходя ко второму этапу, следует иметь ввиду, что закрепление грунта может увеличить коэффициент постели и уменьшить горизонтальное давление лишь до определенных значений, что обусловлено физико-механическими характеристиками природного грунта и технологическими параметрами закрепления.

При этом горизонтальное давление грунта обусловлено прочностными характеристиками C и φ , а коэффициент постели – модулем деформации E . Следовательно, изменение давления и коэффициента постели управляется этими параметрами.

В то же время известно, что при закреплении грунтов методом напорной инъекции по сути этого процесса происходит уменьшение коэффициента пористости, который корреляционно связан с модулем деформации E , коэффициентом внутреннего трения φ и удельным сцеплением C , что отражено в таблицах Б.1 – Б.8 [7].

Таким образом, необходимо решить задачу расчета количественного изменения коэффициента пористости при закреплении грунта и определить максимально возможное снижение коэффициента пористости, а следовательно, увеличения C , φ и E , чтобы сопоставить их значения с требуемыми коэффициентом постели C'_i и давлением грунта q'_i для использования в дальнейших расчетах.

При использовании в качестве закрепления грунта инъекции цементного раствора, осуществляемой методом напорного давления (15 – 20 Атм), в грунтовое основание внедряется раствор, который сжимает окружающий грунт, уменьшая его пористость. Минеральные частицы грунта считаются несжимаемыми и их объем остается неизменным.

При этом вода в порах может оставаться в неизменном объеме, если объем заинъектированного раствора занимает только объем пор, не занятых водой. Если давление нагнетаемого раствора достаточно для обеспечения фильтрации поровой воды, т.е. больше, чем начальный градиент напора i_0 для данного грунта, то вода из пор может отжиматься в соседние области и пористость будет уменьшаться до некоторой критической величины.

В глинистых грунтах при условии создания «быстрого» внутреннего давления при инъектировании раствора в грунт фильтрация грунтовой (поровой) воды за пределы закрепляемой зоны практически невозможна или возможна в небольших, трудно определяемых объемах.

Исходя из этого, определим объем раствора, требуемый для ликвидации воздушной части (объема) пор без фильтрации поровой воды.

Объем пор в единице объема грунта

$$n = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_s}. \quad (8)$$

Вес воды в единице объема

$$V_{\text{в}} = \gamma - \gamma_d = \omega \cdot \gamma_d, \quad (9)$$

где ω – влажность; γ_d – вес сухого грунта; γ_s – вес минеральных частиц; γ – объемный вес грунта.

Все эти физические характеристики определяются лабораторным путем и включаются в состав отчета об инженерно-геологических изысканиях.

Тогда объем воздуха (объем пор, не занятых поровой водой) – $V_{\text{возд.}}$, а следовательно объем раствора V_p определится как

$$V_{\text{возд}} = V_p = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_s} - \omega \gamma_d = \frac{\gamma_s - \gamma_d(1 + \omega \gamma_s)}{\gamma_s} = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}(1 + \omega \gamma_s). \quad (10)$$

Используя формулу (10), можно определить объем инъецируемого в грунт раствора, при котором грунт получает полное водонасыщение (степень влажности $J_w=1$), а затем можно определить коэффициент пористости укрепленного грунта.

Для определения коэффициента пористости укрепленного грунта примем следующие допущения:

– при инъецировании раствора в грунт уменьшение объема пор происходит вследствие частичного их заполнения нагнетаемым раствором.

– фактический объем инъецированного раствора в грунт определяется способностью грунта уплотняться и способностью фильтровать поровую воду за пределы укрепляемого (расчетного) объема грунта.

Известно, что коэффициент пористости грунта e определяется как

$$e = \frac{n}{m}, \quad (11)$$

где n – объем пор в единице объема; m – объем твердых частиц в единице объема.

При инъецировании раствора в объеме V_p в грунт происходит следующее: объем пор уменьшается на величину V_p , а объем твердых частиц увеличивается на V_p . Здесь принято, что цементный раствор после твердения является твердым несжимаемым телом с нулевой пористостью.

Тогда коэффициент пористости закрепленного грунта e_y становится равным

$$e_y = \frac{n - V_p}{m + V_p}. \quad (12)$$

Объем твердых частиц m численно равен отношению веса твердых частиц в единице объема (численно равным весу сухого грунта в единице объема γ_d) к их удельному весу γ_s , т.е.

$$m = \frac{\gamma_d}{\gamma_s}. \quad (13)$$

Объем пор в единице объема равен n :

$$n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} \quad (14)$$

Тогда коэффициент пористости e_y закрепленного грунта путем инъецирования в единицу объема грунта раствора объемом V_p равен

$$e_y = \frac{1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s} - V_p}{\frac{\gamma_d}{\gamma_s} + V_p} = \frac{\gamma_s(1 - V_p) - \gamma_d}{\gamma_d + V_p \gamma_s}. \quad (15)$$

где V_p определяется по формуле (10).

Используя полученное значение коэффициента пористости укрепленного грунта e_y , определяются характеристики E_i , φ и C . Это позволяет определить для укрепленного грунта коэффициент постели по формуле (3.13) [4], а также горизонтальное давление грунта по формуле (2).

В случае закрепления несвязных грунтов с высоким коэффициентом фильтрации принимаем допущение, что при инъектировании раствора в грунт возможно отжатие поровой воды в соседние незакрепляемые области, а, следовательно, достижение более низкого значения коэффициента пористости и более высоких механических характеристик укрепленного грунта.

Тогда решая обратную задачу, определяя последовательно требуемые значения E , φ и C и далее соответствующий им коэффициент пористости, можно определить, какой объем раствора V_p нужно закачать на единицу объема закрепляемого грунта, чтобы получить требуемые механические характеристики грунта.

$$V_p = \frac{\gamma_s - \gamma_d(1 + e_y)}{\gamma_s(1 + e_y)}. \quad (16)$$

Здесь значение e_y можно определить, исходя из требуемых E , φ и C по таблицам Б.1 – Б.8 [7].

11. На втором этапе оптимизации определяются оптимальные объемы зон закрепления выше и ниже дна котлована, которые определяются их размерами.

Для выполнения первого расчета в итерационном цикле определяем размеры зон закрепления, исходя из следующих соображений.

Величина зоны закрепления грунта y перед фронтальной гранью сваи ниже дна котлована принимается не менее $3d$ (где d – диаметр поперечного сечения сваи или толщина «стены в грунте») из условия закрепления деформационной зоны, принимающей участие в сопротивлении горизонтальному давлению.

Глубина зоны закрепления является переменной величиной, т.е. параметром оптимизации. Для первого расчета ее можно принимать равной глубине точки нулевых перемещений, определенной из первого расчета. При этом перемещение U_i глубины конечного элемента должно быть близким к нулю.

Начальное значение величины зоны закрепления грунта выше дна котлована определяется следующим расчетом.

Из практического опыта закрепления грунтов напорной инъекцией следует, что закрепление верхних слоев грунта до некоторой глубины нецелесообразно, так как закрепляющий состав под давлением выдавливается на поверхность (в зону наименьшего сопротивления). Поэтому из технологических условий задаемся глубиной z' , ниже которой следует осуществлять закрепление. Для глинистых грунтов можно принять $z'=3$ м, для несвязных $z'=4$ м.

Далее расчетом определяется положение линии скольжения как прямой линии под углом к вертикали $45 - \frac{\varphi}{2}$, где φ – угол внутреннего трения природного грунта (рис. 2, а). Точка пересечения горизонтальной прямой на глубине z' с линией скольжения дает размер зоны закрепления по горизонтали «а» и определяется по формуле.

$$a = (h - z') \cdot \operatorname{tg}(45 - \frac{\varphi}{2}). \quad (17)$$

В глинистых грунтах эта величина определяется с учетом «давления связности». При этом эпюра давления грунта принимает вид на рисунке 2, б. Здесь значение q_z' в

пределах длины z' определяется по исходным значениям φ и C , а ниже ($q_{h-z'}$) – по значениям φ и C закрепленного грунта.

Высота зоны закрепления от дна котлована $h_z=h-z'$ является переменной величиной, т.е. является параметром оптимизации, которая из-за технологических ограничений может изменяться только в меньшую сторону.

12. Используя новые значения коэффициента постели C_i' и горизонтального давления q_i' с учетом возможности их достижения путем закрепления методом напорной инъекции, выполняем серию расчетов по вышеописанной методике, определяем перемещение верха удерживающей конструкции, изменяя на каждой итерации высоту зоны закрепления выше дна котлована и глубину зоны закрепления ниже дна котлована путем перекрестного перебора этих значений с шагом 0,05 их начального значения.

Конечным результатом расчета является соблюдение одновременно двух условий.

Первое условие – условие (3)

Второе условие –

$$V_3 \rightarrow \min, \quad (18)$$

где V_3 – суммарный объем зон закрепления выше и ниже дна котлована.

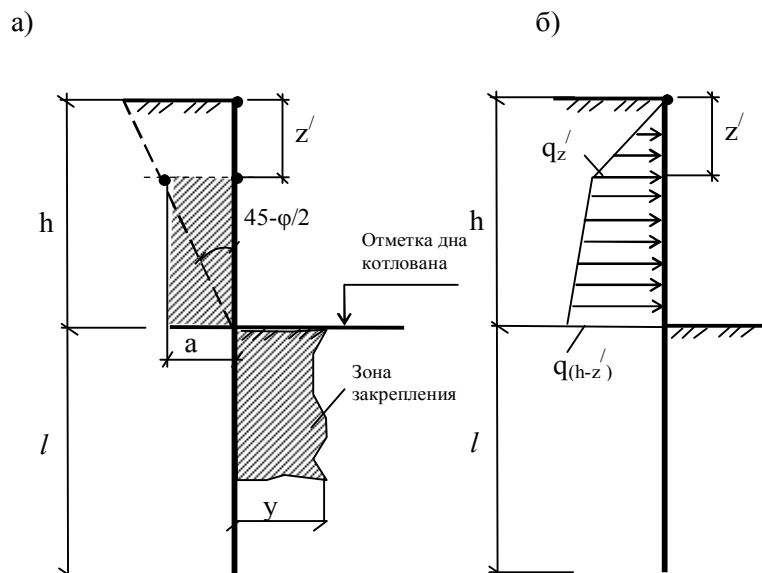


Рисунок 2 – Схема определения зоны закрепления грунта выше и ниже дна котлована (а) и эпюра давления грунта после закрепления (б)

Если значение q' , а следовательно соответствующие этому давлению прочностные характеристики C и φ являются физически недостижимыми, то необходимо менять конструктивное решение удерживающей конструкции борта котлована, например увеличить размер рабочего сечения этой конструкции или применить анкерные конструкции и выполнить новый цикл расчетов до удовлетворения условий (3) и (18).

Выводы. 1. Разработана методика определения параметров закрепления грунтов ограждения глубоких котлованов с использованием двухэтапной итерационной схемы из условия минимального объема закрепления, обеспечивающего перемещение верха удерживающей конструкции в допустимых пределах.

2. Разработан метод определения рационального объема зоны закрепления выше и ниже дна котлована, достаточного для обеспечения достижения заданных ограничений.

Литература

1. Опыт устройства котлованов в городе Москве / В.А. Ильичев и др. // Актуальные вопросы геотехники при решении сложных задач нового строительства и реконструкции:

сб. тр. науч.-техн. конф. / Санкт-Петербургский госуд. архит.-строит. ун-т. – СПб., 2010. – С. 33 – 37.

2. Ильичев, В.А. Расчет оптимальных размеров грунтоцементного массива для снижения осадок окружающих зданий при строительстве подземного комплекса на площади Тверская Застава в городе Москва / В.А. Ильичев, Ю.А. Готман // Строительство и реконструкция, 2011. – № 3 (35). – С. 9 – 17.

3. Готман, А.Л. Расчет свай переменного сечения на совместное действие вертикальной и горизонтальной нагрузок методом конечных элементов / А.Л. Готман // Основания и фундаменты и механика грунтов, 2000. – №1. – С. 6 – 12.

4. Яковлев, П.И. Взаимодействие сооружений с грунтом и свайные основания / П.И. Яковлев, А.Л. Готман, Р.Г. Курмаев. – Одесса: Астропринт, 2004. – 509 с.

5. Mešič, N. Deep excavation design to carry out construction of national and university library by Jože Plečnik (NUK II) in Ljubljana, Republic of Slovenia / N. Mešič, M. Pavlič, M. Fašalek // Proc. of the 17th Internat. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Olexandria, 2009. – P. 2516 – 2519.

6. Yang T.S. Application characteristics using deep cement mixing method in various soil conditions / T.S. Yang, G.H. Jeong, J.D. Koo // Proc. of the 1st Intern. Symposium on Geotechnical Safety and Risk. – China: Shanghai, 2007. – P. 617 – 629.

7. СП 22.13330.2011 Основание зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство», 2011. – 178 с.

Надійшла до редакції 05.10.2012

© А.Л. Готман, Ю.А. Готман